

Franz Joos

Technische Verbrennung

Verbrennungstechnik,
Verbrennungsmodellierung, Emissionen

Mit 449 Abbildungen und 65 Tabellen

 Springer

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung.....	1
1.1	Energiewirtschaft.....	1
1.2	Primärenergie.....	5
1.3	Wandlung von Primärenergie in Nutzenergie.....	7
1.4	Verbrennung.....	9
1.5	Flammen.....	11
	Literatur.....	14
2.	Brennstoffe.....	15
2.1	Einfache Kohlenwasserstoffe als Brennstoffe.....	16
2.2	Feste fossile Brennstoffe.....	24
2.3	Flüssige fossile Brennstoffe.....	27
2.4	Gasförmige fossile Brennstoffe.....	29
2.5	Regenerative Brennstoffe.....	31
2.6	Brennstoffe für Gasturbinen.....	33
2.7	Kraftstoffe der Verbrennungsmotoren.....	41
2.8	Brennstoffe mit zugesetztem Oxidator.....	44
2.8.1	Treibstoffe.....	45
2.8.2	Sprengstoffe.....	46
	Literatur.....	49
3.	Grundlagen.....	51
3.1	Grundlagen der Thermodynamik.....	51
3.2	Die Hauptsätze der Thermodynamik.....	59
3.3	Die Standard-Bildungsenthalpien.....	64
3.4	Thermodynamische Funktionen, Gleichgewichtskriterien, Chemisches Potential.....	71
3.5	Die Bestimmung der adiabaten Flammentemperatur, der Heizwert.....	78
	Literatur.....	84

4.	Verbrennungsrechnung.....	85
4.1	Die Verbrennungsrechnung für feste und flüssige Brennstoffe ...	85
4.1.1	Erforderlicher Sauerstoff- und Luftbedarf.....	86
4.1.2	Abgasmenge und -Zusammensetzung.....	90
4.2	Die Verbrennungsrechnung für gasförmige Brennstoffe.....	100
	Literatur.....	107
5.	Chemische Reaktionskinetik.....	109
5.1	Die Beschreibung homogener chemischer Reaktionen.....	110
5.1.1	Die Reaktionsgeschwindigkeit.....	110
5.1.2	Gleichgewichtsreaktionen.....	114
5.1.3	Elementarreaktionen.....	115
5.1.4	Radikalkettenreaktionen.....	119
5.1.5	Temperaturabhängigkeit des Geschwindigkeitskoeffizienten....	124
5.1.6	Druckabhängigkeit des Geschwindigkeitskoeffizienten.....	126
5.2	Die Beschreibung heterogener Reaktionssysteme.....	129
5.2.1	Heterogen katalysierte Reaktionen.....	129
5.2.2	Adsorption.....	134
5.2.3	Umsatzgeschwindigkeit katalysierter Reaktionen.....	136
5.2.4	Filmdiffusion und Reaktion.....	139
5.2.5	Porendiffusion und Reaktion.....	143
	Literatur.....	148
6.	Reaktionsmechanismen.....	151
6.1	Detaillierte Chemie.....	152
6.2	Methoden der Vereinfachung von Reaktionsmechanismen.....	156
6.2.1	Einfache Reaktionsfolge mit analytischer Lösung.....	156
6.2.2	Quasistationarität.....	158
6.2.3	Empfindlichkeitsanalyse (Sensitivitätsanalyse).....	160
6.2.4	Eigenwertanalyse von chemischen Reaktionsmechanismen.....	165
6.2.5	Partielle Gleichgewichte.....	170
6.2.6	Reaktionsflussanalyse.....	174
6.3	Numerische Verfahren zur Reduktion der Rechenzeit von Reaktionsmechanismen.....	176
6.3.1	Das Reduktionsverfahren der intrinsischen niedrigdimensionalen Mannigfaltigkeit (ILDM).....	177
6.3.2	Flamelet Generated Manifolds (FGM).....	185
6.3.3	Automatisierte Reduktionsmethoden (CARM).....	186
6.3.4	Adaptive Tabellenerstellung (ISAT).....	187
6.3.5	Reduktion von Reaktionsmechanismen mittels genetischer Algorithmen.....	188

6.3.6	Reduktion des Rechenaufwandes mittels neuronaler Netze.....	192
	Literatur.....	194
7.	Flammenstabilisierung.....	199
7.1	Physik der Flammenstabilisierung.....	199
7.2	Stabilisierung selbstzündender Flammen.....	210
7.3	Flammeninstabilität in der Nähe der Zünd- und Löschgrenzen.....	212
7.4	Löschabstand.....	213
	Literatur.....	215
8.	Zündprozesse.....	217
8.1	Physikalische Grundphänomene der Zündung.....	218
8.1.1	Zündgrenzen, Zündtemperatur.....	218
8.1.2	Mindestzündenergie.....	225
8.2	Modellvorstellungen von Zündprozessen.....	226
8.2.1	Vereinfachte thermische Theorie der Zündung von Semenov ...	227
8.2.2	Thermische Theorie der Zündung von Frank-Kamenetskii	229
8.2.3	Zündverhalten des H_2/O_2 -Systems.....	231
8.3	Selbstzündvorgänge von Kohlenwasserstoff-Luftgemischen. . .	235
8.3.1	Messmethode der Selbstzündung.....	236
8.3.2	Methan/Luftgemische.....	238
8.3.3	Gemische gasförmiger höherer Kohlenwasserstoffe.....	240
8.3.4	Gemische flüssiger höherer Kohlenwasserstoffe.....	248
8.4	Zündung von festen Brennstoffen.....	253
8.4.1	Phänomenologische Betrachtung der Feststoffzündung.....	254
8.4.2	Experimentelle Untersuchungen.....	257
8.4.3	Modellierung des Zündprozesses von Kohlepartikel.....	259
8.4.4	Selbstzündeffekte bei festen Brennstoffen.....	262
8.5	Detonationen.....	266
	Literatur.....	268
9.	Laminare Vormischflammen.....	277
9.1	Flammengeschwindigkeit.....	278
9.2	Messverfahren der Flammengeschwindigkeit.....	280
9.2.1	Rohrreaktor.....	282
9.2.2	Rührkessel.....	285
9.3	Messwerte der Flammengeschwindigkeit.....	286
9.4	Theoretische Beschreibung der laminaren Flammengeschwindigkeit.....	293
9.4.1	Vereinfachte thermische Theorie der Flammenausbreitung	294

9.4.2	Numerische Modellierung der Flammengeschwindigkeit	303
9.5	Laminare Flammenstrukturen.....	307
	Literatur.....	310
10.	Laminare nicht-vorgemischte Flammen ..	313
10.1	Erscheinungsformen nicht-vorgemischter Flammen.....	313
10.2	Abschätzung der Flammenlänge.....	315
10.3	Modellierung nicht-vorgemischter Gegenstromflammen	317
10.4	Mischungsbruchbeschreibung nicht-vorgemischter Flammen mit schneller Chemie.....	321
	Literatur.....	328
11.	Turbulente reaktive Strömungen.....	329
11.1	Grunderscheinungen turbulenter nichtreaktiver und reaktiver Strömungen.....	329
11.2	Turbulente Skalen.....	332
11.3	Erscheinungsformen turbulenter Flammen.....	335
11.3.1	Die turbulente Flammengeschwindigkeit.....	335
11.3.2	Experimentelle Bestimmung turbulenter Flammengeschwindigkeiten.....	339
11.4	Mathematische Beschreibung turbulenter reaktiver Strömungen.....	343
11.4.1	Die Erhaltungsgleichungen, die Navier-Stokes'schen- Gleichungen.....	343
11.4.2	Direkte Numerische Simulation (DNS).....	346
11.4.3	„Large-Eddy“-Simulation (LES).....	349
11.4.4	Zeitliche- bzw. Favre-Mittelungsverfahren.....	351
11.4.5	Gemittelte Erhaltungsgleichungen (RANS, TRANS, URANS).....	354
11.4.6	Turbulenzmodelle.....	356
11.4.7	Problematik der Mittelung von Reaktionsgeschwindigkeiten in turbulenten Strömungen.....	361
11.4.8	(U)RANS mit statistischer Beschreibung (PDF) der Turbulenz-Chemie-Interaktion zur Schließung des Quellterms.....	364
	Literatur.....	370
12.	Schließungsmodelle turbulenter nicht-vorgemischter Flammen.....	373
12.1	Das Eddy-Dissipations-Modell (EDM).....	376
12.2	Das linearisierte Finite-Rate-Chemistry-Modell (FRCM).....	377

12.3	Angenommene Wahrscheinlichkeitsdichtemodelle (Presumed-PDF).....	379
12.3.1	Das Mischungsbruchmodell mit Presumed-PDF.....	380
12.3.2	Das Flamelet-Modell.....	385
12.3.3	Das Flamelet-Modell mit Presumed-PDF.....	388
12.4	Das PDF-Transportgleichungsmodell.....	390
12.4.1	Einleitung.....	390
12.4.2	Statistische Beschreibung des thermochemischen Zustandes	392
12.4.3	Herleitung der PDF-Transportgleichung.....	394
12.4.4	Mischungsmodellierung.....	396
12.4.5	Monte-Carlo-Lösungsverfahren.....	399
12.4.6	Kopplung mit CFD-Programmen.....	401
12.5	Das Conditional Moment Closure Modell.....	403
12.6	Das Flame Surface Density Modell.....	404
12.7	Modellvergleich mit experimentellen Daten.....	405
12.7.1	Beschreibung der Sandia-Flamme.....	405
12.7.2	Ergebnisse.....	407
12.8	Überblick über die vorgestellten Modelle.....	409
	Literatur.....	411

13. Schließungsmodelle turbulenter Vormischflammen.....415

13.1	Charakterisierung turbulenter vorgemischter Flammen.....	416
13.2	Modelle turbulenter Vormischflammen.....	420
13.2.1	Definition der Reaktionsfortschrittsvariablen.....	421
13.2.2	Auf der skalaren Dissipationsrate basierende Modelle.....	422
13.2.3	Auf der Flammentopologie basierende Modelle.....	423
13.2.4	Statistische Modelle mit Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen.....	427
	Literatur.....	429

14. Modellierung der Verbrennung flüssiger Brennstoffe.....433

14.1	Phänomenologie der Verbrennung flüssiger Brennstoffe.....	434
14.2	Zerstäubung.....	435
14.2.1	Zerstäuber.....	436
14.2.2	Primärzerfall.....	438
14.2.3	Sekundärzerfall.....	444
14.2.4	Einflüsse auf die Zerstäubung.....	448
14.2.5	Beschreibung eines Sprays.....	453
14.3	Modellierung des Tropfenzerfalls.....	455

14.3.1	Empirische Modellierung.....	456
14.3.2	Mechanische Modellierung.....	460
14.4	Verdampfung.....	463
14.4.1	Quasi-eindimensionale Abschätzung der Tropfenverdampfung ..	464
14.4.2	Detailliertere Berechnung des abdampfenden Massenstroms	468
14.4.3	Berechnung der Tropfentemperatur.....	473
14.5	Modelle zur numerischen Beschreibung von Mehrphasenströmungen.....	481
14.5.1	Lokal homogene Modelle (LHF-Modelle, locally homogeneous flow).....	481
14.5.2	Modelle unter Beachtung der Dispersion (SF-Modelle, separated flow).....	484
14.6	Turbulente Dispersion.....	496
14.6.1	Deterministische Verfahren.....	496
14.6.2	Stochastische Verfahren.....	497
14.6.3	Particle Cloud Tracking Modelle.....	504
14.7	Sprayverbrennung.....	509
14.7.1	Verbrennung von Einzeltröpfchen.....	509
14.7.2	Verbrennung eines Sprays.....	511
	Literatur.....	512

15. Die Verbrennung fester Brennstoffe.....519

15.1	Einleitung.....	520
15.2	Kohlefeuerungen.....	521
15.3	Phänomenologie des Kohleverbrennungsprozesses.....	527
15.4	Berechnungsmethodik der Kohleverbrennung.....	532
15.4.1	Strömungsfeld.....	534
15.4.2	Wärmeübertragung.....	538
15.4.3	Die heterogene Kohleverbrennungsmodellierung.....	545
15.4.4	Die Berücksichtigung der homogenen Gaphasen-reaktion.....	563
15.4.5	Berechnungsbeispiele von Kohlefeuerungen.....	564
	Literatur.....	570

16. Stationäre, eindimensionale Strömungen mit Wärmezufuhr.....577

16.1	Wärmezufuhr im Kanal mit veränderlichem Querschnitt.....	577
16.2	Wärmezufuhr im Kanal konstanten Querschnitts.....	580
16.2.1	Berechnung des statischen Druckverhältnisses.....	580
16.2.2	Berechnung des Totaldruckverhältnisses.....	582
16.2.3	Kritische Wärmezufuhr.....	586
	Literatur.....	589

17.	Emissionen der Verbrennung von Kohlenwasserstoffen.....	591
17.1	Primärenergie und Luftschadstoffe.....	591
17.2	Emission der Stickoxide (NO_x).....	596
17.2.1	Bildungsmechanismen der Stickoxide.....	597
17.2.2	Bildungsmechanismen des Thermischen NO (Zeldovich-/VO) ..	601
17.2.3	Bildungsmechanismen des Prompten NO (Fenimore-/VO).....	605
17.2.4	Über Distickstoffoxid (N_2O , Lachgas) erzeugtes NO	606
17.2.5	Über das AW//-Radikal gebildetes NO	607
17.2.6	Bildungsmechanismen der Konversion von brennstoff gebundenem Stickstoff in NO	608
17.2.7	NO_x -Bildung bei Abgasrückführung.....	610
17.2.8	Grundlegende Zusammenstellung der Primärmaßnahmen zur NO_x -Reduktion.....	613
17.3	Kohlenmonoxid (CO).....	615
17.4	Unverbrannte Kohlenwasserstoffe als Schadstoffemissionen....	616
17.5	Bildung von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK , PAH) als Rußvorgänger.....	618
17.6	Ruß.....	619
	Literatur.....	628
18.	Gasturbinenbrennkammern.....	633
18.1	Konventionelle Brennkammern von Gasturbinen.....	633
18.1.1	Funktionsweise.....	634
18.1.2	Brennkammerbauformen.....	637
18.1.3	Brennstoffeindüsung.....	639
18.1.4	Der Brennkammerdruckverlust.....	642
18.1.5	Die Temperaturverteilung am Brennkammeraustritt.....	643
18.1.6	Betriebsverhalten einer konventionellen Fluggasturbinenbrennkammer.....	645
18.2	Gasturbinenbrennkammertechnologie zur Reduktion der Emissionen.....	648
18.2.1	Technologie schadstoffreduzierter Brennkammer (LEC).....	649
18.2.2	Magerverbrennung gasförmiger Brennstoffe (DLE).....	650
18.2.3	Magerverbrennung flüssiger Brennstoffe.....	655
18.2.4	Fett-Magerverbrennung (RQL , Rich burn - Quick quench - Lean burn).....	668
18.2.5	Lean Direct Injection Systeme (LDI).....	672
18.2.6	Nachverbrennung.....	675
18.2.7	Alternative Brennstoffe.....	677
18.2.8	Absenkung der Flammentemperatur.....	681

18.3	Katalytische Verbrennung.....	682
	Literatur.....	686

19. Primäre Reduktion der Stickoxid-emission bei Feuerungsanlagen.....689

19.1	/VOjt-reduzierte Kohlefeuerung.....	689
19.2	Modellierung der <i>NOx-BMung</i>	693
19.3	Stickoxidbildung bei gestufter Verbrennung.....	697
19.4	Emissionen ausgeführter Feuerungsanlagen.....	703
19.4.1	Kohlefeuerungen von Kraftwerken.....	703
19.4.2	Ölgefeuerte Anlagen.....	704
19.4.3	Gasgefeuerte Anlagen.....	705
	Literatur.....	706

20. Sekundäre Maßnahmen der Abgasreinigung.....711

20.1	Entschwefelung bei Feuerungsanlagen.....	712
20.1.1	Trockenadditiv-Verfahren.....	712
20.1.2	Waschverfahren.....	712
20.2	Entstickung bei stationären und mobilen Anlagen.....	714
20.2.1	Selektive nichtkatalytische Reduktion (<i>SNCR</i>).....	715
20.2.2	Katalytische Verfahren bei stationären Anlagen.....	715
20.2.3	Der Drei-Wege-Katalysator mit mobilen Anlagen.....	716
20.3	Partikelrückhaltung bei stationären Anlagen.....	718
20.4	Rußentfernung bei mobilen Anlagen, Abgasreinigung des Dieselmotors.....	722
	Literatur.....	723

21. CO₂-Sequestrierung.....725

21.1	CO ₂ -Abscheidungstechniken.....	726
21.1.1	Abgasreinigung.....	727
21.1.2	CO ₂ -arme Kraftwerkskonzepte.....	727
21.1.3	Auswirkungen und Verbrennungsprozess.....	731
21.2	CO ₂ -Verwertung.....	732
21.3	CO ₂ -Deponierung.....	732
21.4	Mögliche Umweltwirkungen der Abscheidungstechnologien ...	733
	Literatur.....	735

22.	Thermoakustik von Brennkammern.....	737
22.1	Einleitung.....	738
22.2	Anregungsmechanismen der Brennkammerpulsationen.....	738
22.2.1	Phänomen der fremderregten Brennkammerschwingungen.....	739
22.2.2	Das Phänomen der selbsterregten Brennkammer Schwingungen.....	740
22.3	Abhilfemaßnahmen.....	746
22.3.1	Modifikation am Brenner, am Brennraum oder an der Brennstoff- bzw. Luftzuführung.....	747
22.3.2	Passive Dämpfungsmaßnahmen.....	749
22.3.3	Aktive Stabilisierungsmaßnahmen.....	751
22.4	Analysemethoden der Thermoakustik.....	754
22.4.1	Experimentelle Untersuchungsmethoden.....	754
22.4.2	Akustische Stabilitätsanalysen der Brennkammer.....	755
22.4.3	Verzugszeitmodelle.....	757
22.4.4	Stabilitätsanalysen mit Flammenübertragungsfunktionen.....	758
22.4.5	Instationäre CFD-Berechnung.....	763
	Literatur.....	766
23.	Wärmeübertragung in Brennräumen.....	775
23.1	Wärmeübertragungsprozesse vom Heißgas auf die Wand.....	777
23.1.1	Wärmeaustausch durch Strahlung.....	777
23.2	Wärmeleitung innerhalb der Wand.....	787
23.3	Wärmeabgabe der Wand.....	790
23.3.1	Strahlungsaustausch mit der Umgebung.....	790
23.3.2	Konvektion auf der kalten Wandseite.....	790
23.4	Wärmedurchgang durch die Wand.....	798
23.5	Wände mit vergrößerter Oberfläche.....	799
23.6	Filmkühlung der Heißgasseite.....	801
	Literatur.....	808
24.	Motorische Verbrennung.....	811
24.1	Thermodynamische Modellierung des Brennverlaufs.....	811
24.2	Beschreibung der dieselmotorischen Verbrennung.....	817
24.2.1	Einleitung.....	817
24.2.2	Strahlmodellierung.....	818
24.2.3	Wandwärmeübergang.....	820
24.2.4	Selbstzündung.....	821
24.2.5	Verbrennungsmodell.....	821
24.2.6	Schadstoffbildung.....	821
24.2.7	Beispiele dieselmotorischer Verbrennungssimulation.....	822

24.3	Beschreibung der ottomotorischen Verbrennung.....	827
24.3.1	Einleitung.....	827
24.3.2	Verbrennungsmodelle.....	827
24.3.3	Beispiele ottomotorischer Verbrennungssimulation.....	832
24.4	Primäre Maßnahmen zur Emissionsreduktion von Verbrennungsmotoren.....	833
24.4.1	Absenkung der Spitzentemperaturen.....	833
24.4.2	Abgasrezirkulation (EGR).....	834
24.5	Zusammenfassung.....	837
	Literatur.....	838

25. Standardmessverfahren der Luftschadstoffe.....841

25.1	Überblick.....	842
25.2	Chemilumineszenzanalysator für NO_x	844
25.3	Nichtdispersiver Infrarotanalysator (NDIR) für alle Gase.....	845
25.4	Flammen-Ionisations-Detektor (FID) für HC	847
25.5	Paramagnetischer Analysator (PMA) für O_2	847
25.6	O_3 -Nachweis durch UV-Absorption.....	848
25.7	SO_2 -Nachweis durch t/V-Fluoreszenz.....	848
25.8	Die Fotometrie.....	849
25.9	Kolorimetrie.....	851
25.10	Konduktometrie.....	851
25.11	Chromatographische Verfahren.....	852
25.12	Olfaktometrie.....	853
25.13	Rauchmessung.....	853
25.14	Nachweis von Schwebstoffen (Feinstaub, PM_{10} , $PM_{2,5}$) in der Luft.....	857
25.14.1	Partikeltrennung durch einen Kaskadenimpaktor.....	858
25.14.2	Messung der Staubbiederschläge aus der Atmosphäre.....	859
25.14.3	Messung der Staubkonzentration der Luft.....	859
25.14.4	Staubmessung durch Absorption von β -Strahlung.....	861
25.15	Luftkontrollstation.....	862
25.16	Standard verfahren zur Messung der Emissionen von Gasturbinen und Kraftfahrzeugen.....	863
25.17	Umrechnungen und Konzentrationen.....	863
25.17.1	Feuchtigkeitskorrektur.....	864
25.17.2	Der Emissionsindex EI.....	864
25.17.3	Der Verbrennungswirkungsgrad.....	866
	Literatur.....	866

26.	Gesetze und Verordnungen zur Luftreinhaltung.....	867
26.1	Internationale Vereinbarungen.....	867
26.1.1	Die „Genfer UNECE-Konvention über weiträumige, grenzüberschreitende Luftverunreinigungen“ von 1979.....	868
26.1.2	Das Protokoll zur Begründung des europäischen Mess- und Bewertungsprogramms für Luftschadstoffe“ von 1984....	869
26.1.3	Das „Helsinki-Protokoll“ von 1985.....	870
26.1.4	Das „Sofia-Protokoll“ von 1988.....	870
26.1.5	Das „Genfer-Protokoll“ von 1991.....	871
26.1.6	Das „Oslo-Protokoll“ von 1994.....	871
26.1.7	Das „Kyoto-Protokoll“ von 1997.....	871
26.1.8	Das „Aarhus-Protokoll“ von 1998.....	873
26.1.9	Das „Göteborg-Protokoll“ von 1999.....	873
26.1.10	Internationale Abgasgrenzwerte für den Luftverkehr.....	875
26.1.11	Andere internationale Regelungen.....	876
26.2	EU-Recht.....	877
26.2.1	Die „Luftqualitäts-Rahmenrichtlinie“ von 1996.....	878
26.2.2	Die „1. Tochterrichtlinie für SO_2 , NO_2 , PM_{10} und Blei“ von 1999.....	878
26.2.3	Die „VOC-Richtlinie“ von 1999.....	878
26.2.4	Die „3. Tochterrichtlinie über den Ozongehalt der Luft“ von 2002.....	879
26.2.5	Die „Großfeuerungsanlagen-Richtlinie“ von 2001.....	879
26.2.6	Die „Richtlinie über nationale Emissionshöchstgrenzen für bestimmte Luftschadstoffe“ von 2002.....	879
26.2.7	Abgasgrenzwerte für den Verkehr.....	880
26.3	Nationale Gesetzgebung.....	882
26.3.1	Allgemeines.....	882
26.3.2	Das „Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge“ in der Fassung vom 11. September 2002.....	884
26.3.3	Zusammenstellung der Verordnungen des BImSchG.....	885
26.3.4	Kleinfeuerungsanlagen (1. BImSchV).....	889
26.3.5	Großfeuerungsanlagen(13. BImSchV).....	890
26.3.6	Sonstige Feuerungsanlagen (TA-Luft).....	891
26.3.7	Abfallverbrennungsanlagen (17. BImSchV).....	894
26.3.8	Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetz (UVPG).....	896
	Literatur.....	896

Anhang.....897
Literatur.....900
Sachverzeichnis.....901